

基于非平稳背景下的红外小目标检测

刘 靳 姬红兵

(西安电子科技大学工程学院 西安 710071)

摘 要: 针对非平稳复杂背景下单帧图像的红外小目标检测概率较低的问题, 该文提出了一种基于当前残差的改进 M 估计的红外背景预测和抑制算法。该算法利用 M 估计的基本模型预测背景, 将目标像素和观测噪声视为背景估计的混合干扰, 提出与背景图像残差相关的校正函数 $c(\varepsilon)$ 自适应地调整估计增益, 从而减小异常样本对背景估计的影响, 提高了估计的准确性。同时引入遗忘因子 α 使算法能够适应于非均匀复杂背景的估计, 提高了算法的鲁棒性。多组红外图像实验表明: 所提算法不仅能够非平稳背景下有效地估计背景, 还能在滤除背景的同时最大程度地保留目标像素的信息, 提高了目标的检测概率。

关键词: 小目标检测; 非平稳背景估计; M 估计模型; 校正函数; 遗忘因子

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1295-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01083

IR Small Targets Detection Based on Non-homogeneous Background

Liu Jin Ji Hong-bing

(School of Electronics Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: For lower detection probability problem of small IR targets in a complex non-homogeneous background, an improved M-estimation filtering algorithm based on residual is proposed to suppress background clutters. The algorithm introduces the basic model of M-estimation to predict background, and target pixels and observed noise are considered as the mixed interference of background estimation. It puts forward the correction function $c(\varepsilon)$ related to residual to adaptively adjust gain to reduce the abnormal samples influence of background estimation and increases the accuracy of estimation. Meanwhile, the proposed algorithm uses the forget factor α to entreat the non-homogeneous background prediction and the robustness is improved. Experimental results on IR images illustrate that the proposed algorithm can not only predict background effectively in non-homogeneous background but preserve targets information to maximum extent. As a result, the proposed algorithm has higher detection probability.

Key words: Small targets detection; Non-homogeneous background estimation; M-estimation model; Correction function; Forget factor

1 引言

基于运动非平稳复杂背景下的红外小目标检测一直是这一领域研究的热点问题。远距离情况下, 目标在成像平面上表现为仅占几个像素的弱小目标, 目标像素少, 缺乏形状信息, 并淹没在复杂非均匀的背景之中。检测的关键在于有效地消除背景, 提高信噪比、增加对比度, 突显目标像素。

目前, 实现背景预测和消除的主要途径分成两大类: 红外图像序列的帧间背景对消和单帧图像的自适应背景估计^[1,2]。前者适合于静态视场中运动目

标的检测, 当成像平台和目标同时运动或背景快速变化时, 背景对消效果明显变差。而后者是基于单帧图像的目标检测, 是当前红外弱小目标探测的一个研究热点, 主要依靠各种自适应背景预测和抑制方法。常用的背景估计方法有: 中值(Median)滤波及其改进算法^[3,4]、最小二乘估计(Least Square Estimation, LSE)算法、自适应最小均方(Adaptive Least Mean Square, ALMS)估计算法及其改进算法^[5,6]以及其他自适应统计方法^[7,8]等。中值滤波能够很好抑制脉冲噪声的影响, 但对加性高斯噪声的抑制效果较差, 特别是在高度非均匀背景下, 在背景边界附近容易产生虚警。最小二乘估计等方法主要依赖于线性预测模型估计背景, 具有好的抗加性高斯噪声性能, 但抗脉冲噪声性能较差, 特别是在目

2009-08-13 收到, 2010-01-25 改回

国家自然科学基金(60677040)资助课题

通信作者: 刘靳 jinliu@xidian.edu.cn

标像素处的背景估计直接影响目标检测性能。M-估计具有良好的抗脉冲噪声和异常样本的能力。本文基于 M-估计原理和红外图像中背景的局部缓变和全局非均匀特点,在改进的自适应序贯 M 估计算法中引入了校正函数以减小异常样本对背景估计的影响,同时引入遗忘因子适应于红外图像背景的空间非均匀性。改进后的算法不仅能够抑制简单背景而且能够抑制非平稳的复杂背景,扩大了小目标检测工程应用的范围。

论文章节安排如下。第 2 节简单介绍了 M 估计的基本模型。第 3 节推导了改进的 M 估计滤波(IMEF)算法并将其应用于红外背景估计并给出背景估计的准则。第 4 节给出算法的仿真实验结果和性能评价。第 5 节为结论。

2 M 估计的基本模型

M 估计是基于最大似然准则的一种常用稳健估计方法,其观测符合以下线性模型^[9]:

$$y_i = x_i^H \mathbf{W} + \varepsilon_i, \quad 1 \leq i \leq N \quad (1)$$

其中 \mathbf{W} 是未知的 p 维回归参数矢量, y_i 、 x_i 和 ε_i 分别是第 i 次观测的因变量, p 维自变量和随机误差,上标 H 表示共轭转置。进一步地,权向量 \mathbf{W} 的 M 估计定义为下面优化问题的解^[10]:

$$\widehat{\mathbf{W}} = \arg \min_{\mathbf{W}} \left\{ \sum_{i=1}^N f(y_i - x_i^H \mathbf{W}), \mathbf{W} \in R^p \right\} \quad (2)$$

其中,函数 $f(x)$ 是实值的且具有 1 阶连续导数的非负偶函数。 \mathbf{W} 的 M 估计是依赖于函数 $f(x)$ 的,当 $f(x) = x^2$ 时, M 估计对应为 \mathbf{W} 的最小二乘估计。

令式(2)中的代价函数对 \mathbf{W} 的偏导数为零,可以得到方程组

$$\sum_{i=1}^N \phi(y_i - x_i^H \mathbf{W}) x_i = 0 \quad (3)$$

其中 $\phi(x)$ 是 $f(x)$ 的 1 阶导函数。引入新的函数 $c(x) = \phi(x)/x$ (并且有 $\lim_{x \rightarrow 0} f'(x)/x = 0$), 则式(3)等价于非线性方程组

$$\sum_{i=1}^N c(\varepsilon_i) x_i^H \mathbf{W} x_i = \sum_{i=1}^N c(\varepsilon_i) y_i x_i \quad (4)$$

其中 $\varepsilon_i = y_i - x_i^H \mathbf{W}$ 。权向量 \mathbf{W} 的 M 估计的矩阵形式为

$$\widehat{\mathbf{W}} = [\mathbf{X}^H \mathbf{C}(\varepsilon) \mathbf{X}]^{-1} \mathbf{X}^H \mathbf{C}(\varepsilon) \mathbf{Y} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^H$ 是 $N \times p$ 的数据矩阵, $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^H$ 是 N 维向量, $\mathbf{C}(\varepsilon) = \text{diag}[c(\varepsilon_1), c(\varepsilon_2), \dots, c(\varepsilon_N)]$ 是 $N \times N$ 的对角矩阵。

由式(5)可知,等式的右边仍然是 \mathbf{W} 的函数。一方面,获取所有输入输出样本难以实现;另一方

面,由于存在大型矩阵的求逆使得计算的复杂度和实时性难以保证。因此,需要对基本的 M 估计模型进行改进以适应红外图像处理的要求。

3 基于 IMEF 滤波的红外小目标检测

3.1 M 估计改进算法的推导

假定所有观测互相独立。则 k 次观测下 \mathbf{W} 的 M 估计可表示为

$$\widehat{\mathbf{W}}(k) = [\mathbf{X}^H(k) \mathbf{C}_k(\varepsilon) \mathbf{X}(k)]^{-1} \mathbf{X}^H(k) \mathbf{C}_k(\varepsilon) \mathbf{Y}(k) \quad (6)$$

其中 $\mathbf{X}(k), \mathbf{Y}(k), \mathbf{C}_k(\varepsilon)$ 的定义类似于式(5), 仅仅 N 被 k 所代替。

计入了第 $k+1$ 次观测的 M 估计则表示为

$$\widehat{\mathbf{W}}(k+1) = [\mathbf{X}^H(k+1) \mathbf{C}_{k+1}(\varepsilon) \mathbf{X}(k+1)]^{-1} \cdot \mathbf{X}^H(k+1) \mathbf{C}_{k+1}(\varepsilon) \mathbf{Y}(k+1) \quad (7)$$

令 $\mathbf{Q}^{-1}(k+1) = \mathbf{X}^H(k+1) \mathbf{C}_{k+1}(\varepsilon) \mathbf{X}(k+1)$, 根据矩阵求逆定理则有

$$\mathbf{Q}(k+1) = [\mathbf{I} - g(k+1) x_{k+1}^H] \mathbf{Q}(k) \quad (8)$$

其中

$$g(k+1) = c(\varepsilon_{k+1}) \mathbf{Q}(k) x_{k+1} / [\mathbf{I} + c(\varepsilon_{k+1}) x_{k+1}^H \mathbf{Q}(k) x_{k+1}]$$

进一步地,得到权向量的迭代/更新公式为

$$\widehat{\mathbf{W}}(k+1) = \widehat{\mathbf{W}}(k) + g(k+1) \varepsilon_{k+1} \quad (9)$$

式(9)是权向量 \mathbf{W} 的序贯 M 估计,它表明增加的观测是通过自适应增益作用到残差上。另外,考虑到很多红外应用场合中,场景是时变或空变的,也就是说只有时间或空间上邻近的样本符合一个预测模型。为了适合这种类型的应用,本文考虑了具有遗忘因子 α 的 IMEF 迭代算法。由于图像两帧间大部分区域都是具有强相关性的,可以通过计算图像的均值和方差自适应调节本次迭代的遗忘程度且其取值范围为 $0 < \alpha < 1$, 遗忘因子的初始化一般在 0.60~0.95 之间经验取值。具有遗忘因子的 IMEF 迭代方程组如下:

$$\widehat{\mathbf{W}}(k+1) = (1 - \alpha) \widehat{\mathbf{W}}(k) + \alpha g(k+1) \varepsilon_{k+1} \quad (10)$$

$$g(k+1) = c(\varepsilon_{k+1}) \mathbf{Q}(k) x_{k+1} / [\alpha + c(\varepsilon_{k+1}) x_{k+1}^H \mathbf{Q}(k) x_{k+1}] \quad (11)$$

$$\varepsilon_{k+1} = y_{k+1} - x_{k+1}^H \mathbf{W}(k) \quad (12)$$

$$\mathbf{Q}(k+1) = \alpha^{-1} [\mathbf{I} - g(k+1) x_{k+1}^H] \mathbf{Q}(k) \quad (13)$$

由式(11)可知,通过引入校正函数 $c(\varepsilon)$ 使得自适应增益 $g(k+1)$ 与当前的残差 ε_{k+1} 有关。这与传统改进算法中将修正后的残差代入式(10)进行迭代计算而保持其他的计算流程不变是不同的。本文的改进算法并不修正残差,而是通过引入校正函数实时地对估计增益进行调节,以此来改善增益的稳健性。IMEF 算法能够在非均匀环境下,尤其是在有突出

干扰等非高斯噪声背景下,不断地根据邻近样本的性质调整预测权值,使其参数估计的收敛速度更快,估计误差更小。因此,我们利用 IMEF 算法解决非平稳复杂背景下红外小目标的检测问题。

3.2 基于 IMEF 滤波的红外小目标检测

单帧红外场景图像可以被描述为^[11]

$$I(m, n) = T(m, n) + B(m, n) + N(m, n) \quad (14)$$

其中 $T(m, n)$ 为目标图像, $B(m, n)$ 为背景图像, $N(m, n)$ 为噪声图像。

红外弱小目标可认为是理想点源经过点扩展函数后的成像,表现为图像中稀疏的小亮斑。而背景成大面积连续分布状态,邻近像素的灰度值间具有很强的空间相关性,用邻近像素点的灰度值通过线性预测能够较精确地预测当前像素的值。在基于单帧红外图像的小目标检测中,背景估计和背景抑制是目标检测的关键。一旦图像背景被很好预测,从观测图像中减去背景,目标检测就变成了在背景残差和噪声中的目标检测问题。在考虑背景预测时,需要预测的是 $B(m, n)$, 而目标像素 $T(m, n)$ 被看成稀疏的脉冲干扰,虽然这些像素点的数目非常少,但其预测误差非常大,对预测滤波器影响很大,必须消除它们的影响。假定背景图像 $B(m, n)$ 和观测图像 $I(m, n)$ 符合下面的模型

$$B(m, n) = \sum_{(p, q) \in S} w(p, q) I(m - p, n - q) = \mathbf{W}^T \mathbf{S} \quad (15)$$

其中 $\mathbf{W} = \{w(p, q)\}$ 为预测权系数向量, \mathbf{S} 为 $I(m, n)$ 的某个去心邻域。不同权系数向量对应不同的背景估计算法。从观测图像中减去估计的背景就得到残差图像,即

$$\mathbf{E}(m, n) = \mathbf{I}(m, n) - \mathbf{B}(m, n) \quad (16)$$

在残差图像中,可以用白噪声背景下的目标检测方法发现目标。本文所提图像背景估计算法的具体执行过程如表 1。

表 1 图像背景估计算法的执行过程

IMEF 算法
输入: 观测图像 $I(m, n)$; 权向量 \mathbf{W} 窗口尺寸; 遗忘因子 α ; 噪声标准差 σ_n 。
输出: 残差图像 $\mathbf{E}(m, n)$ 。
算法步骤:
(1) 初始化预测权向量
$\mathbf{W}_0 = \arg \min_{\mathbf{W}} \left\{ \sum_{m=1}^{N_1} \sum_{n=1}^{N_2} \left(I(m, n) - \sum_{(p, q) \in S} \mathbf{W}(p, q) I(m - p, n - q) \right)^2 \right\}$
其中在边界处通过对称延拓补充 $m - p$ 或 $n - q$ 小于 1 时的样本点。
(2) 把 $m \times n$ 的图像按行(保证样本的近邻关系)排成 $m \times n$ 的长向量, 记作 $\mathbf{I}_k, k = 1, 2, \dots, m \times n$, 相应的每个向量的去心邻域

内的像素值排成一个向量序列, 记作 $\mathbf{S}_k, k = 1, 2, \dots, m \times n$ 。

(3) for $k = 0 : m \times n - 1$

(4) 计算像素 \mathbf{I}_{k+1} 用预测权向量 \mathbf{W}_k 估计时的残差 $\varepsilon_{k+1} = \mathbf{I}_{k+1} - \mathbf{W}_k^T \mathbf{S}_{k+1}$ 。

(5) 计算自适应增益

$$g(k+1) = c(\varepsilon_{k+1}) \mathbf{Q}(k) x_{k+1} / [\alpha + c(\varepsilon_{k+1}) x_{k+1}^T \mathbf{Q}(k) x_{k+1}]$$

(6) 评判校正函数 $c(\varepsilon) = \begin{cases} 1, & |\varepsilon| \leq 2\sigma_n \\ e^{(2\sigma_n/|\varepsilon|-1)}, & |\varepsilon| > 2\sigma_n \end{cases}$

其中 σ_n 是噪声的标准差。

(7) 更新权向量 $\mathbf{W}_{k+1} = (1 - \alpha) \mathbf{W}_k + \alpha g(k+1) \varepsilon_{k+1}$

(8) if $k \leq m \times n - 1$ then return to (3)

(9) else End

由步骤(6)-步骤(7)可以得出, 函数 $c(\varepsilon)$ 的引入是为了减小异常样本对背景估计的影响, 适应红外图像中背景的局部缓特征。当预测误差小于 $2\sigma_n$ 时, 认为该像素点仅仅包含了背景和噪声, 残差主要由背景残差和噪声构成, 残差用于修正当前预测权值; 当残差远大于 $2\sigma_n$ 时, 该像素点被认为包含了目标, 函数 $c(\varepsilon)$ 的值迅速减小接近到零, 残差几乎不改变当前的权向量。IMEF 背景抑制算法具有自动抑制较大偏差的功能。遗忘因子的引入有利于在非均匀背景下提高背景的抑制能力。这样, 得到的残差图像 $\varepsilon_k, k = 1, 2, \dots, m \times n$ 或重排后的图像 $\mathbf{E}(m, n)$ 和噪声被假定为空间平稳的白高斯噪声, 其概率密度函数具有下面形式

$$P(\mathbf{E}(m, n)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(\mathbf{E}(m, n) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (17)$$

由于残差图像中目标像素的数量很少, 概率密度函数的均值和方差很容易从图像的局部块中估计, 因此后面总假定它们是已知的。对于给定的虚警概率 P_f , 很容易从概率密度函数中计算出判决门限。按照判决门限, 当一个像素的值大于门限时判决为目标像素; 否则, 判决为非目标像素。检测概率 P_d 计算公式如下^[12]:

$$P_d = F_{\text{det}} / F_{\text{tar}} \quad (18)$$

其中 F_{det} 为序列中正确检测出目标的帧数, F_{tar} 为序列中实际存在目标的帧数。图像信噪比定义为

$$\text{SNR} = 20 \lg \frac{G_t - G_b}{\sigma} \quad (19)$$

其中 G_t 表示目标的灰度值, G_b 表示背景的平均灰度, σ 为背景的标准差。

4 实验结果与分析

图 1(a)-1(c)所示为从 3 组实测天空背景的红外序列中分别选出的 3 帧红外图像。图 1(a)中含有两个目标(白框所示), 图像背景较为单一, 图像大小

为 320×240 ，序列共计 70 帧图像。图 1(b) 中含有一个目标(白框所示)，图像背景有一定的起伏变化，图像大小为 240×240 ，序列共计 113 帧图像。图 1(c) 中也只有一个目标(白框所示)，图像背景起伏变化大，图像大小为 320×240 ，序列共计 95 帧图像。图 1(d)–1(f) 为对应的 3 维灰度图。其中 X 坐标为图像的列坐标， Y 坐标为图像的行坐标， Z 坐标为图像的灰度值。

文中比较了空域中值(Med)滤波(窗口尺寸为 5×5)，最小均方(LMS)滤波，以及本文所提的 IMEF 滤波(初始化权向量窗口尺寸为 5×5 ，遗忘因子 $\alpha = 0.8$)的抑制效果。抑制结果如图 2 所示，其中箭头所指位置为真实目标在图像中的位置。

从图 2 的背景抑制 3 维灰度结果图可以看出，对于像图 1(a) 所示背景单一的滤波估计，Med 滤波、LMS 滤波和本文提出的 IMEF 滤波都能够不同程度地抑制背景，优势并不明显；对于像图 1(b) 所示背景有一定起伏的滤波估计，Med 滤波抑制背景的同时丢失了大量的目标信息，LMS 滤波能够较好地保留目标信息，但是背景干扰抑制不足。由于校正函数的作用 IMEF 滤波能够在抵消背景干扰的同时保留目标的像素信息；对于像图 1(c) 所示背景起伏大，非平稳的图像滤波估计，Med 滤波的背景抑制效果较差，LMS 滤波虽能够较好地抑制背景，但出现了异常样本的干扰。由于校正函数和遗忘因子的引入，IMEF 滤波能够减小异常样本对背景估计的影响，同时适应于红外图像背景的空间非均匀性。在干净消除背景的同时，本文方法最好地保留了目标像素的信息。

为了更客观地评估算法的检测性能，对 3 组红外序列在不同信噪比下各算法的目标检测概率进行了实验仿真，实验结果如表 2 所示。

在虚警率 $P_f = 10^{-4}$ 时，在不同信噪比下对 3 类实测红外图像分别采用 Med 滤波、LMS 滤波和改进的自适应序贯 M 估计滤波进行背景估计。根据残差图像的均值和方差，利用传统的阈值分割法在背景抑制后的图像上进行目标的单帧检测，不同算法下 3 类序列的检测概率如表 2 所示。由表 2 的检测结果可以看出，当信噪比一定时，IMEF 滤波的检测概率要高于其他两种滤波方法的检测概率；当信噪比较低时，IMEF 滤波的检测概率明显高于其他两种滤波方法的检测概率。有效的背景抑制算法对后续的目标检测起到关键的作用，本文方法能够在较低的信噪比条件下有效地估计背景，很好地保留目标信息，从而目标的检测概率有了明显的提高。

5 结束语

针对非平稳背景下单帧红外图像的小目标检测问题，本文提出了一种基于改进 M 估计的红外背景预测和抑制算法。新的估计方法引入了校正函数 $c(\varepsilon)$ 减小异常样本对背景估计的影响，通过像素间的残差 ε 实时调节背景估计的自适应增益。引入了遗忘因子 α 以便使算法能够更好地适应于复杂的非均匀背景的估计。反复实验仿真及实际项目中的应用表明，在不同信噪比的条件下本文算法都能够较好地估计背景，突显出红外弱小目标，最大程度地保留目标的信息，检测结果和算法稳健性更好。

该方法对基于运动特征的远距离红外弱小目标

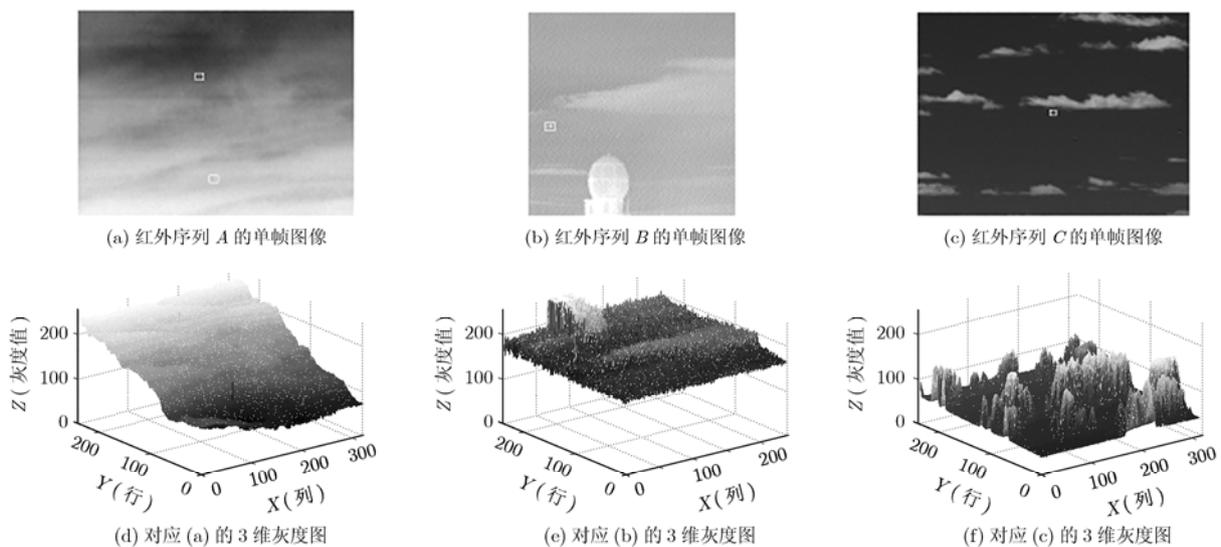


图 1 3 类实测红外图像序列的某一帧及对应的 3 维灰度图

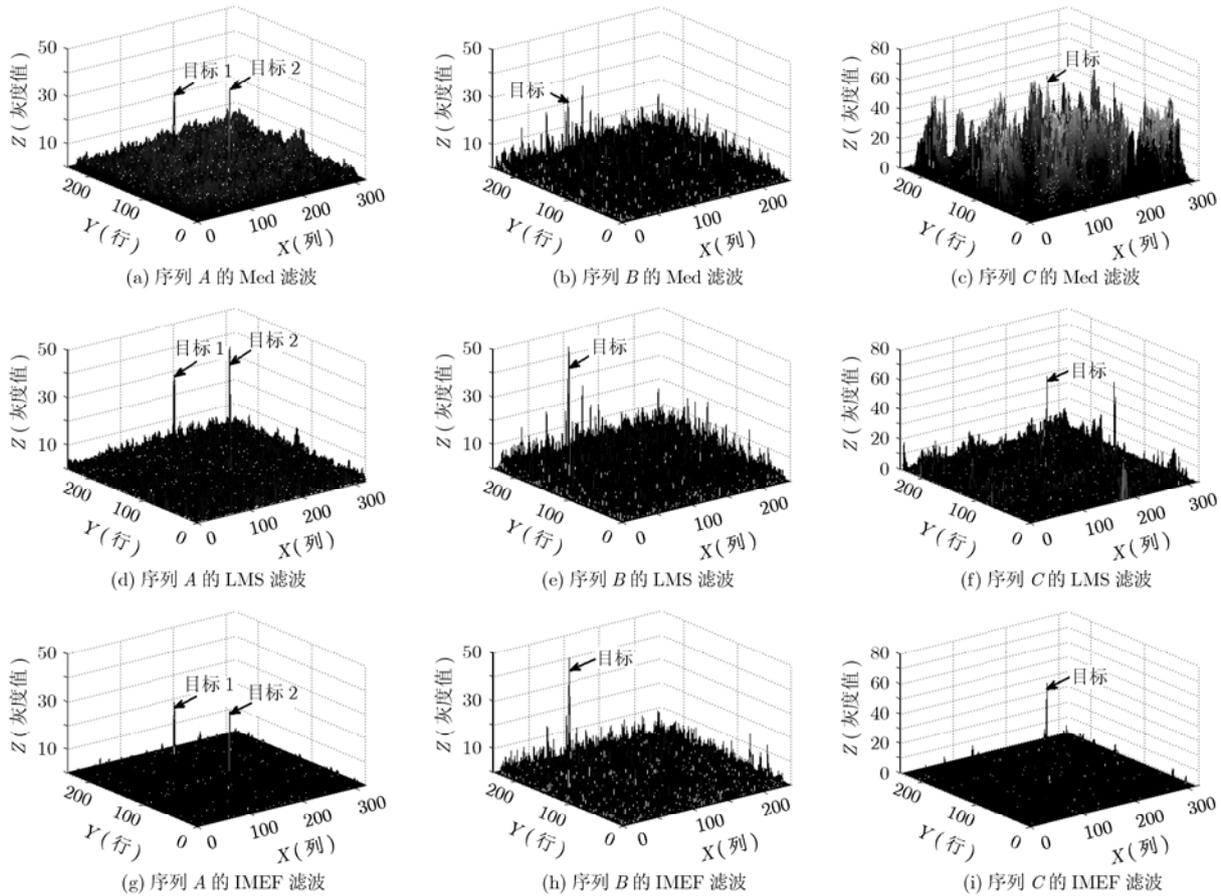


图 2 3 类红外单帧图像在不同背景抑制方法下的 3 维灰度结果图

表 2 不同方法下 3 类序列对应的目标检测概率(%)

		SNR(dB)				
		-5	-3	0	2	5
序列 A	Med 滤波	62.86	71.43	82.86	88.57	97.14
	LMS 滤波	75.71	81.43	90.00	95.71	98.57
	IMEF 滤波	85.71	88.57	95.71	98.57	100.00
序列 B	Med 滤波	66.37	76.11	85.84	92.92	99.12
	LMS 滤波	81.42	85.84	92.04	97.35	100.00
	IMEF 滤波	86.73	91.15	95.58	99.12	100.00
序列 C	Med 滤波	61.05	69.47	81.05	88.42	98.95
	LMS 滤波	75.79	85.26	91.58	96.84	100.00
	IMEF 滤波	87.37	90.53	95.79	98.95	100.00

检测提供了有益的参考。为了进一步消除背景抑制后仍存在的极少量虚假目标点, 可结合利用目标运动信息(如航迹关联、管道滤波等)的技术和方法, 以更好的发挥本文算法的性能。

参 考 文 献

[1] Wang Jing, Bao Shang-qi, and Ralph J F, *et al.* Detection of small objects in multi-layered infrared images [C]. Signal and

Data Processing of Small Targets, 2008. Proceedings of the SPIE, 2008, 6969: 696905-696905-8.

[2] Wemett B D. Automatic target detection using vector quantization error [C]. Automatic Target Recognition XVIII. Proceedings of the SPIE, 2008, 6967: 696712-696712-10.

[3] 宗思光, 王江安. 基于形态学图像融合的目标检测方法 [J]. 光电子·激光, 2004, 15(2): 208-211.

Zong Si-guang and Wang Jiang-an. Infrared image targets

- detection based on multi-scale mathematical morphology fusion [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2004, 15(2): 208–211.
- [4] 陈远, 王凌, 冯华君等. 高散射介质后向扩散散射实验的图像预处理 [J]. *光电子 • 激光*, 2005, 16(11): 1373–1377.
Chen Yuan, Wang Ling, and Feng Hua-jun, *et al.* Image pre-processing for diffuse backscattering of polarized light from highly scattering media [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, 16(11): 1373–1377.
- [5] Manolakis D G, Ingle V K, and Kogon S M. Statistical and Adaptive Signal Processing [M]. Boston: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1999, Chapter 8.
- [6] Wang P, Tian J W, and Gao C Q. Infrared small target detection using directional high pass filters based on LS-SVM [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(3): 156–158.
- [7] Tang Zhen-min and Wang Xin. An efficient algorithm for infrared small target detection [C]. Second International Conference on Information and Computing Science ICIC'09, 2009, 2: 51–54.
- [8] 曹瑛, 李志永, 卢晓鹏等. 基于自适应领域双边滤波的点目标检测预处理算法 [J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(8): 1909–1912.
Cao Ying, Li Zhi-yong, and Lu Xiao-peng, *et al.* A preprocessing algorithm of point target detection based on temporal-spatial bilateral filter using adaptive neighborhoods [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 1909–1912.
- [9] Huber P J and Ronchetti E M. Robust Statistics (2nd Ed.) [M]. New York: Wiley, 2009, Chapter 3.
- [10] Haykin S. Adaptive Filter Theory (4th Ed.) [M]. US, Prentice Hall, 2001, Chapter 8.
- [11] 罗军辉, 姬红兵, 刘靳. 一种基于空间滤波的红外小目标检测算法及其应用 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(3): 209–212.
Luo Jun-hui, Ji Hong-bing, and Liu Jin. Algorithm of IR small targets detection based on spatial filter and its application [J]. *Journal of Infrared and Millimeter-wave*, 2007, 26(3): 209–212.
- [12] Braga-Neto U, Choudhary M, and Goutsias J. Automatic target detection and tracking in forward-looking infrared image sequences using morphological connected operators [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(4): 802–813.
- 刘靳: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为图像处理、图像融合、目标检测与识别等.
- 姬红兵: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理、模式识别等.